



НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 629.4.027.118:621.3.028
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-3-1>

Сравнительный анализ характеристик бандажей колёсных пар, закалённых с использованием лазерного и плазменного источника тепла



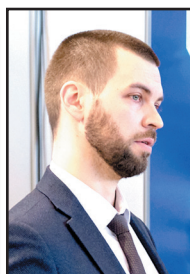
Евгений ХРИПОВИЧ



Игорь ШИГАНОВ



Дарья ПОНОМАРЕНКО



Сергей ШМЕЛЕВ



Эмиль ИШКИНЯЕВ

Евгений Владимирович Хрипович^{1,2}, Игорь Николаевич Шиганов², Дарья Викторовна Пономаренко³, Сергей Андреевич Шмелев¹, Эмиль Дамирович Ишкиняев⁴

¹ ООО Научно-техническое объединение «ИРЭ-Полус», Фрязино, Россия.

² Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана, Москва, Россия.

³ Российский государственный университет нефти и газа (НИУ) имени И. М. Губкина, Москва, Россия.

⁴ Научно-исследовательский ядерный университет (НИЯУ МИФИ), Москва, Россия.

✉ ehriptovich@ntoir-polus.ru.

АННОТАЦИЯ

Боковой износ гребня колёсной пары локомотива является одним из основных видов износа, возникающего при эксплуатации подвижного состава. Важной характеристикой обода железнодорожного колеса является его износостойкость, которая напрямую зависит от содержания углерода в стали. Содержание углерода в колёсной стали 2 в количестве 0,55–0,65 связано с тем, что при его меньшей концентрации увеличивается доля зернограничного феррита, что приводит к снижению контактной прочности колёс, а при большей – приводит к склонности к хрупкому разрушению. Повышенное содержание углерода позволяет осуществить закалку поверхности стали. Для уменьшения износа гребня бандаж и увеличения ресурса колёсных пар локомотивов возможно применение технологий плазменного и лазерного упрочнения.

Целью данной работы является определение преимуществ и недостатков технологий лазерного и плазменного упрочнения рабочих поверхностей бандажей колёсных пар железнодорожного подвижного состава.

В работе проводится сравнительный анализ микроструктуры и микротвёрдости упрочнённых методом плазменной и лазерной закалки бандажей колёсных пар тепловоза 2ТЭ25КМ, выполненных из колёсной стали 2 ГОСТ 398-2010.

Поставленные задачи решались с использованием теоретических и экспериментальных методов исследования. Подготовка и исследование закалённых образцов выполнено на оборудовании испытательной лаборатории ООО НТО «ИРЭ-Полус».

Проведено исследование зон упрочнения в различных областях и участках бандаж. Проведены трибологические испытания на износостойкость образцов, закалённых с использованием высокомоощного волоконного лазера. Выявлены основные преимущества и недостатки процессов лазерной и плазменной закалки.

Проведённые исследования позволяют сделать вывод о высокой перспективности применения технологии лазерной закалки для упрочнения бандажей колёсных пар как альтернативы процессу плазменного упрочнения.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт, лазерная закалка, плазменная закалка, колёсная пара, колёсная сталь.

Для цитирования: Хрипович Е. В., Шиганов И. Н., Пономаренко Д. В., Шмелев С. А., Ишкиняев Э. Д. Сравнительный анализ характеристик бандажей колёсных пар, закалённых с использованием лазерного и плазменного источника тепла // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 3 (100). С. 6–12. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-3-1>.

Полный текст статьи на английском языке публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Внедрение принципиально новых технологий лазерной закалки среднеуглеродистых и высокоуглеродистых сталей с применением волоконных промышленных лазеров и специальных оптических головок, позволяющих выполнять обработку бандажа за один проход с шириной зоны упрочнения до 40 мм, является в настоящее время актуальным технологическим направлением. Процесс лазерной закалки имеет целый ряд преимуществ перед другими видами обработки. При воздействии лазерного излучения на поверхности обрабатываемой детали образуются сжимающие напряжения, положительно влияющие на общее напряжённое состояние изделия [1]. Формирование больших напряжений сжатия в закалённом поверхностном слое и снижение напряжений растяжения в переходной зоне является важным фактором повышения работоспособности изделий, работающих в условиях контактных и знакопеременных нагрузок [2]. При лазерной закалке обеспечивается однородность структуры и микротвёрдости по всей глубине зоны упрочнения.

Существенный положительный эффект достигается при сопротивлении ползучести металла. Он связан с тем, что за счёт мелкодисперсной структуры предотвращается пластическое течение стали, которое возникает при наличии резких градиентов температур [3; 4]. За счёт мелкодисперсности структуры упрочнённого слоя обрабатываемая деталь сочетает в себе оптимальные значения пластичности, твёрдости и прочности, что приводит к повышению её триботехнических характеристик [5]. Результатом лазерной термообработки является увеличение контактно-усталостной прочности детали, а также увеличение её износостойкости в несколько раз [6].

Оборудование для лазерной обработки гребней бандажей колёсных пар практически не используется на отечественных ремонтных предприятиях. До недавнего времени оставался единственный участок лазерной закалки на Горьковской железной дороге на базе комплекса «Комета-2» [7]. Плазменная технология закалки бандажей колёсных пар локомотивов является наиболее распространённой. На ремонтных предприятиях, обслуживающих подвижной состав ОАО «РЖД», внедрено около 90 установок, из них многие (не менее 20) по различным причинам не используются [8].

Авторами работы [9] показано, что в зоне плазменной закалки гребней образуются высокие остаточные растягивающие напряжения. При их возникновении в поверхностных слоях возможно суммирование с внешними растягивающими или знакопеременными напряжениями, возникающими в процессе эксплуатации колёсных пар [10]. Описанный эффект может приводить к возникновению дефектов контактно-усталостного происхождения и вызывать образование трещин и выкрашиваний, способных прямо или косвенно влиять на безопасность движения поездов [11; 12].

Полученные при использовании плазменной технологии экспериментальные данные показали, что при плазменной обработке необходимо обеспечить равномерность упрочнённого слоя как по ширине зоны закалки, так и по окружности гребней [2]. Исходя из представленных данных также можно сделать вывод о том, что в процессе плазменного упрочнения может происходить значительный перегрев поверхностного слоя обрабатываемой детали. При лазерной обработке данного эффекта не наблюдается.

Целью данной работы является проведение сравнительного анализа формирования микроструктуры, микротвёрдости и износа упрочнённых методом плазменной и лазерной закалки бандажей колёсных пар тепловоза 2ТЭ25КМ, выполненных из колёсной стали 2.

ОБОРУДОВАНИЕ И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Эксперименты проводились на реальных колёсных парах из стали 2 (ГОСТ 398-2010) с закалкой всей длины бандажей двух колёс. Химический состав колёсной стали определялся с помощью спектрометра Q8 Magellan по ГОСТ 18895 и представлен в табл. 1.

Микроструктура стали (рис. 1) представляет собой тонкопластинчатый перлит с ферритными оторочками шириной 3–7 мкм по его границам. При этом размер перлитных зёрен изменяются в пределах от 35 до 55 мкм. Микротвёрдость такой структуры составляет 295–333 HV_{0,2}.

Работа по лазерной закалке бандажей колёсных пар проводилась на установке обработки тел вращения IPG FL-CPM, укомплектованной волоконным лазером IPG YLS-10000, изготовленной в ООО НТО «ИРЭ-ПОЛЮС» (рис. 2).





Химический состав колёсной стали 2 [выполнено авторами]

C	Si	Mn	Cr	Ni	S	P	Mo	Cu	Co	V
0,595–0,617	0,372–0,397	0,779–0,813	0,025–0,039	0,043–0,073	0,005–0,006	0,011–0,013	0,003–0,005	0,009–0,012	0,025–0,031	0,021–0,025

Рис. 1. Микроструктура основного металла колёсной стали 2, $\times 1000$ [выполнено авторами].

Рис. 2. Установка обработки тел вращения FL-CPM [выполнено авторами].

Для повышения производительности процесса лазерной закалки обработка бандажа осуществлялась прямоугольным профилем луча с размерами 35 x 5 мм. Преобразование круглого профиля пятна лазерного излучения в прямоугольный осуществлялось при использовании специализированного модуля формирователя линейного профиля пятна IPG IRE-POLUS, внешний вид и внутреннее устройство которого приведены на рис. 3.

Плазменная закалка выполнялась на стандартном оборудовании, которое применяется на ремонтных предприятиях, обслуживающих парк локомотивов ОАО «РЖД».

Режимы лазерной закалки: мощность лазерного излучения – 5–8 кВт; линейная скорость закалки бандажей – 5–7,5 мм/сек. Для защиты оптических элементов лазерной головки использовалась поперечная прокатка воздухом.

Режимы плазменной закалки: рабочая мощность источника до 35 кВт; линейная скорость – 5–7,5 мм/сек; ширина зоны воздействия – 28 мм. В качестве плазмообразующего и защитного газа использовался азот. Расход охлаждающей воды составил 0,8 л на одну колёсную пару.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Исследование макроструктуры после плазменной и лазерной закалки проводили на шлифах, вырезанных из центральной части колеса, которая не подвергалась повторному нагреву при замыкании поверхности закалки. На рис. 4 показаны поперечные шлифы упрочнённых участков после плазменной и лазерной обработки с указанием размеров зоны упрочнения.

На макроструктурах рис. 4 видно, что максимальная глубина упрочнённого слоя после плазменной и лазерной закалки сопоставима и составляет примерно 1900 мкм. По краям закалённой зоны в обоих случаях наблюдается плавное снижение глубины до нулевых значений.

На основе изучения микроструктуры и микротвёрдости образцов после лазерной и плазменной закалки обнаружено, что получаемые свойства в различных областях бандажа, отличных от места замыкания, одинаковы, что позволяет выполнять исследование только его центральной части и области замыкания.

Исследование микроструктуры проводили на участках, показанных на рис. 4 и обозначенных цифрами 1, 2, 3. Микроструктура и микротвёрдость среднего участка 2 (рис. 4) для плазменной и лазерной обработки показаны на рис. 5 и 6.

Исследование приповерхностного слоя участка 2 глубиной ~1100 мкм показало, что при плазменной обработке происходит образование мартенситной структуры в виде блоков, по границам которых наблюдаются вкрапления ферритно-карбидной смеси, значения микротвёрдости составляют 766–857 HV_{0,2} (рис. 5а). При лазерной закалке микроструктура состоит из мартенсита с более высокими значениями твёрдости 783–879 HV_{0,1} (рис. 6а).

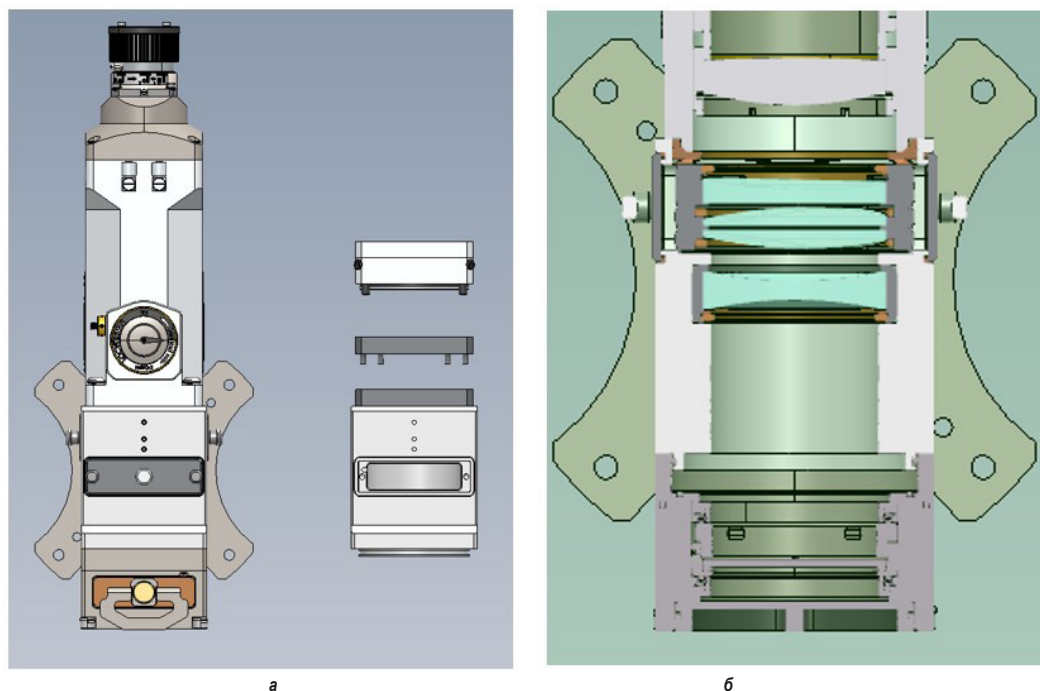


Рис. 3. Формирователь прямоугольного профиля пята: а – внешний вид узла; б – конструкция узла [выполнено авторами].

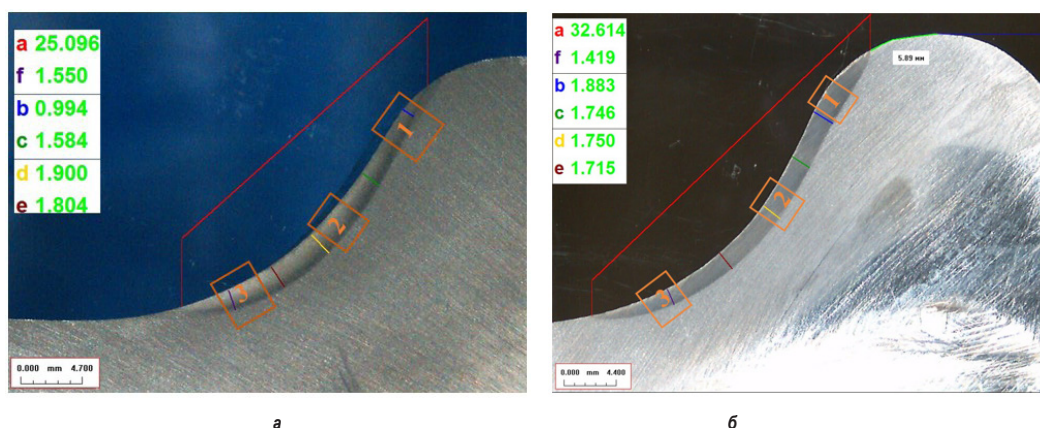


Рис. 4. Макроструктура образца, вырезанного из зоны бандажа колёс: а – после плазменной закалки; б – после лазерной закалки [выполнено авторами].

Удаление от поверхности исследуемого участка на глубину более 1100 мкм приводит при плазменной обработке к образованию зоны протяжённостью 500 мкм с троостито-мартенситной структурой, микротвёрдость которой составляет 471–621 HV_{0,2} (рис. 5б), а при лазерной в зоне протяжённостью около ~400 мкм происходит незначительное снижение микротвёрдости до 726–783 HV_{0,1} и образование в структуре смеси мартенсита и троостита (рис. 6б).

На глубине более 1600 мкм в обоих случаях наблюдается переходная зона протяжённостью ~300 мкм, микроструктура которой представляет собой преимущественно ферритно-карбидную смесь с микротвёрдостью 347–503 HV_{0,2} (рис. 5в) при плазменной закалке и микротвёрдостью 425–669 HV_{0,1} (рис. 6в) при лазерной закалке.

Таким образом, изучение макро- и микроструктуры, а также микротвёрдости различных участков центральной части бандажа после лазерной закалки показало высокие



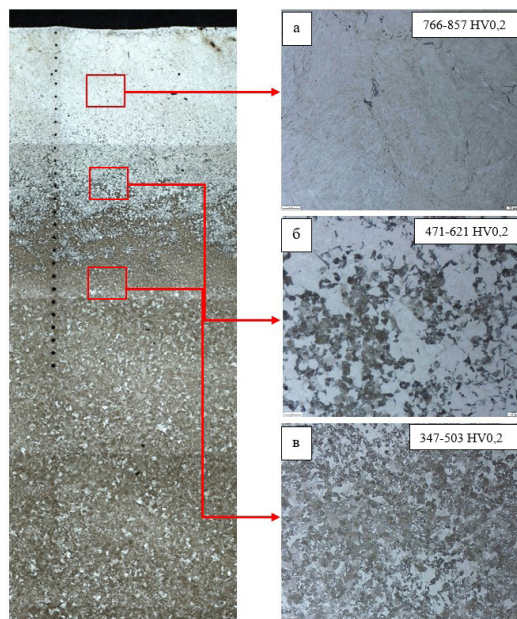


Рис. 5. Микроструктура и микротвёрдость различных зон упрочнённого участка 2 после плазменной закалки [выполнено авторами].

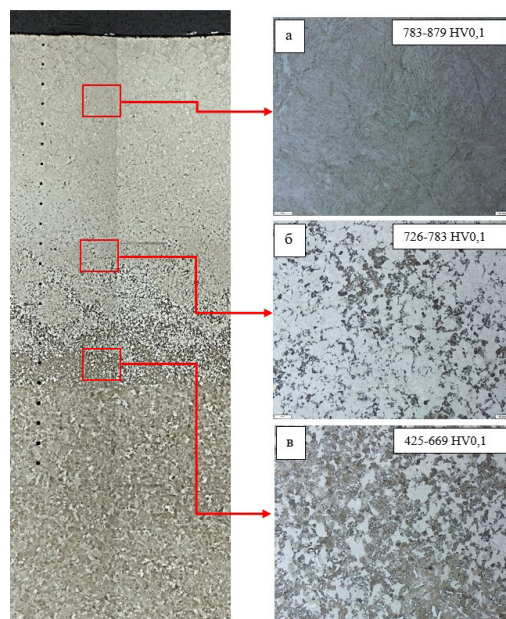


Рис. 6. Микроструктура и микротвёрдость различных зон упрочнённого участка 2 после лазерной закалки [выполнено авторами].

значения твёрдости по всей глубине упрочнённого слоя за счёт формирования мартенситной структуры и ферритно-карбидной смеси высокой дисперсности.

При плазменной и лазерной закалке бандажа колёсной пары образуется замок – место, в котором происходит повторный нагрев вследствие замыкания упрочнённого слоя. В работе проводился анализ данного участка в поперечных и продольных направлениях после лазерной закалки. Глубина максимального упрочнения на участках начала и конца замыкания составляет 1500–1900 мкм, то есть практически на всю глубину закалки. Сравнительный анализ микроструктуры и микротвёрдости в начале и конце замыкания области упрочнения показал формирование по всей глубине закалённого слоя как в начале замыкания, так и в конце, схожего структурно-фазового состава и близких значений микротвёрдости с центральной частью бандажа. Это связано с одинаковым содержанием мартенситной составляющей в структуре соответствующих по расположению зон. Выявлено, что при лазерной закалке зона перекрытия характеризуется мелкодисперсностью даже после повторной перезакалки и минимальной зоной отпуска, в которой значительно снижается вероятность появления дефектов в ходе эксплуатации колёсных пар. Также стоит

отметить, что при обработке с использованием плазменных источников тепла зона разупрочнения в области замыкания больше за счёт высокого теплового нагрева области обработки при выполнении замыкания зоны закалки бандажей колёсных пар, который также приводит к перезакалке и отпуску ранее упрочнённой зоны, что увеличивает вероятность возникновения в этой зоне различного рода дефектов.

Микроструктура участков 1 и 3 при лазерной закалке в соответствующих зонах упрочнённого слоя как в начале, так и в конце замыкания близка, а именно, в поверхностной зоне формируется мартенситная структура с максимальными значениями микротвёрдости 860 HV0,2. По мере удаления от поверхности выделяется троостит и, как следствие, происходит падение микротвёрдости до 750 HV0,2. Переходный слой характеризуется дальнейшим снижением микротвёрдости вследствие формирования преимущественно ферритно-карбидной смеси. Исследование участка замыкания упрочнённого слоя после лазерной закалки показало, что минимальные значения микротвёрдости находятся в диапазоне допустимых значений.

Результаты сравнительного анализа различных областей закалённых бандажей колёсных пар свидетельствуют о том, что

в случае плазменной закалки значения микротвёрдости в поверхностной зоне упрочнённого слоя несколько ниже, чем при лазерной закалке. Однако, при удалении от поверхности в сторону основного металла значения микротвёрдости соответствующих зон значительно различаются. Так, в случае лазерной закалки микротвёрдость переходной зоны выше примерно на 100–150 единиц по Виккерсу. При невысоких значениях твёрдости возрастает вероятность проявления «катастрофического износа» боковых поверхностей гребней колёс и рельсов, связанного с переходом к изнашиванию по механизму задира, для которого требуется сравнительно большой путь непрерывного скольжения при относительно низкой (менее 0,7 м/с) скорости и твёрдости поверхностей не более 600 HV [13].

Показано, что оба вида закалки приводят к формированию в упрочнённом слое градиентно-смешанной структуры. При этом в поверхностном слое при высоких скоростях охлаждения формируется мартенситная структура, а в нижележащих зонах распад аустенита сопровождается образованием ферритно-карбидной смеси различной дисперсности. Стоит отметить, что при лазерной закалке глубина поверхностного слоя с чисто мартенситной структурой больше, что уменьшает глубину зон со смешанной структурой и более низкими значениями микротвёрдости.

В процессе лазерной термической обработки поверхностей сталей в зоне лазерного нагрева происходит образование фаз и структур, схожих по строению со структурами, возникающими при классических методах закалки металлов. Благодаря короткому термическому циклу, вследствие которого не происходит длительной выдержки в аустенитной зоне, микроструктура области закалки является мелкодисперсной по сравнению со структурой, образующейся после плазменной закалки. Данный эффект оказывает положительное влияние на механические свойства приповерхностного слоя упрочняемой детали, что приводит к увеличению значений твёрдости и износостойкости изделий.

Таким образом, высокие значения микротвёрдости по всей глубине упрочнённого слоя, отсутствие резкого изменения структурно-фазового состава при лазерной закалке и формирование преимущественно мартенситной структуры при глубине максимально-

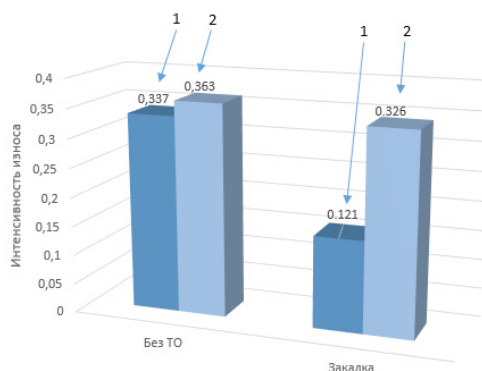


Рис. 7. Интенсивность линейного изнашивания образцов без термообработки и после лазерной закалки: 1 – образец из колёсной стали; 2 – контртело из рельсовой стали [14].

го упрочнения может привести к уменьшению износа в процессе эксплуатации бандажа колёсных пар.

С целью выявления степени влияния лазерной закалки на износостойкость гребней бандажей проведены испытания по схеме плоскость (из колёсной стали 2) и кольцо (из рельсовой стали) с применением машины трения МТУ-01.

На рис. 7 приведены результаты трибологических испытаний на определение величины интенсивности линейного изнашивания I образцов из колёсной стали после лазерного упрочнения и без него, в паре с контртелом из рельсовой стали.

Интенсивность изнашивания определяли по формуле:

$$I = \Delta h / L,$$

где L – путь трения, мм;

Δh – величина износа, мкм.

Из приведённой диаграммы (рис. 7) видно, что при незначительном изменении величины изнашивания рельс происходит значительное изменение стойкости образцов из колёсной стали 2. Проведённые испытания показали высокую эффективность процесса лазерной закалки бандажей колёсных пар.

Таким образом, результаты проведённых сравнительных исследований позволяют сделать вывод о перспективности внедрения технологии лазерного упрочнения приповерхностного слоя бандажей колёсных пар локомотивов. Её внедрение на ремонтных предприятиях позволит снизить среднюю интенсивность износа бандажей и увеличить их ожидаемый средний пробег между отточками в ходе планового технического обслуживания подвижного состава.





ВЫВОДЫ

Глубина упрочнённого слоя после плазменной и лазерной закалки на центральном участке бандажа сопоставима и составляет ~1900 мкм, а на участках, расположенных ближе к краю, ~1500 мкм. При этом глубина максимального упрочнения с повышенными значениями микротвёрдости и мелкодисперсной структурой больше при лазерной закалке.

Оба вида закалки приводят к формированию в упрочнённом слое градиентно-смешанной структуры. В поверхностном слое при высоких скоростях охлаждения формируется мартенситная структура, а в нижележащих зонах распад аустенита сопровождается образованием ферритно-карбидной смеси различной дисперсности. Микроструктура упрочнённого слоя стали после лазерной закалки более однородна.

Трибологические испытания показали, что при незначительном изнашивании рельс стойкость бандажа колёсной пары после лазерной закалки может быть увеличена в 2,8 раза.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Богданов А. В., Грезев Н. В., Шмелев С. А., Мурзиков М. А., Маркушов Ю. В. Упрочнение колёсной стали волоконными лазерами // Научно-технологические исследования в машиностроении. – 2016. – № 9 (63). – С. 30–37. [Электронный ресурс]: <https://bstu.editorum.ru/ru/nauka/article/12986/view>. Доступ 27.05.2022.
2. Богомолов А. В., Канаев А. Т. Плазменная технология упрочнения гребней локомотивных колёсных пар // Инновации в материаловедении и металлургии: материалы I междунар. интерактив. науч.-практ. конф. [13–19 дек. 2011, г. Екатеринбург]. – Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. – Ч. 1. – С. 38–43. [Электронный ресурс]: https://elar.ufr.ru/bitstream/10995/27924/1/ivmim_2011_08.pdf. Доступ 27.05.2022. ISBN 978-5-7996-0708-1, 978-5-7996-0709-8.
3. Богданов А. В., Голубенко Ю. В. Волоконные технологические лазеры и их применение: Учеб. пособие. – СПб.: Лань, 2016. – 208 с. ISBN 978-5-8114-2027-8.
4. Менушинов А. П., Неволлин В. Н., Петровский В. Н. Физические основы лазерной технологии. – М.: НИЯУ МИФИ, 2010. – 210 с. ISBN 978-5-7262-1252-4.
5. Марков Д. П. Трибология и ее применение на железнодорожном транспорте (Труды Всероссийского

научно-исследовательского института железнодорожного транспорта). – М.: Интекст, 2007. – 408 с. ISBN 978-5-89277-080-4.

6. Шмелев С. А., Богданов А. В., Татаркин Д. Ю., Хриптович Е. В. Разработка оптимальных режимов упрочнения контактных поверхностей колёсных пар вагонов и локомотивов с использованием волоконных лазеров // Будущее машиностроения России: Сб. докладов Десятой Всероссийской конференции молодых учёных и специалистов (с международным участием). – 2017. – С. 230–236. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=41786898&pf=1>. Доступ 27.05.2022.

7. Глазунов В. Д. Способы снижения износа колёсных пар подвижного состава // Известия Уральского государственного горного университета. – 2019. – № 2 (54). – С. 107–114. [Электронный ресурс]: https://iuggu.ru/download/2019/2-54-2019/14_Glazunov.pdf. Доступ 27.05.2022. DOI: 10.21440/2307-2091-2019-2-107-114.

8. Петров С. Ю., Рябов А. А., Костюкевич А. И. Упрочнение гребней и снижение износа колёсных пар // Мир транспорта. – 2013. – № 2 (46). – С. 62–69. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=19412518>. Доступ 27.05.2022.

9. Киселев С. Н., Саврухин А. В., Кузьмина Г. Д. Влияние плазменной обработки на напряжённо-деформированное и структурное состояние гребней бандажей колёс локомотивов // Сварочное производство. – 2001. – № 6. – С. 9–17.

10. Буйновосов А. П. Основные причины интенсивного износа бандажей колёсных пар подвижного состава и методы их устранения. – Екатеринбург: Изд-во УрГУПС, 2009. – 223 с. ISBN 978-5-94614-148-2 [ограниченный доступ].

11. Wang, Wenjian; Guo, Jun; Liu, Qiyue. Experimental study on wear and spalling behaviors of railway wheel. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, Vol. 26, Iss. 6, pp. 1243–1249. [Электронный ресурс]: <https://cjme.springeropen.com/counter/pdf/10.3901/CJME.2013.06.1243.pdf>. DOI: 10.3901/CJME.2013.06.1243 [ограниченный доступ].

12. Deters, L., Proksch, M. Friction and wear testing of rail and wheel material. Wear, 2005, Vol. 258, Iss. 7–8, pp. 981–991. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2004.03.045>.

13. Марков Д. П. Механика и трибология бокового износа колёс и рельсов // Вестник РГУПС. – 2003. – № 3. – С. 16–23. [Электронный ресурс]: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=11693847>. Доступ 27.05.2022.

14. Шмелев С. А. Разработка оборудования для получения линейного профиля излучения волоконного лазера, обеспечивающего высокоэффективную обработку гребней железнодорожных колёс // Дисс... канд. техн. наук. – МГТУ имени Н. Э. Баумана (национальный исследовательский университет), 2020. – 166 с. ●

Информация об авторах:

Хриптович Евгений Владимирович – начальник сектора лазерной наплавки и термообработки ООО Научно-технического объединения «ИРЭ-Полюс»; аспирант Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (национального исследовательского университета), Москва, Россия, eHriptovich@ntoire-polus.ru.

Шиганов Игорь Николаевич – доктор технических наук, профессор Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана (национального исследовательского университета), Москва, Россия, inshig@bmstu.ru.

Пономаренко Дарья Викторовна – инженер, ассистент Российского государственного университета нефти и газа (национального исследовательского университета) имени И. М. Губкина, Москва, Россия, dronomarenko@ntoire-polus.ru.

Шмелев Сергей Андреевич – кандидат технических наук, заместитель начальника отдела продаж ООО Научно-технического объединения «ИРЭ-Полюс», Москва, Россия, sShmelev@ntoire-polus.ru.

Ишкиняев Эмиль Дамирович – аспирант, инженер-технолог Национального исследовательского ядерного университета (НИЯУ МИФИ), Москва, Россия, elshkinyaev@ntoire-polus.ru.

Статья поступила в редакцию 13.05.2022, одобрена после рецензирования 24.06.2022, принята к публикации 29.06.2022.

- Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 3 (100). С. 6–12

Хриптович Е. В., Шиганов И. Н., Пономаренко Д. В., Шмелев С. А., Ишкиняев Э. Д. Сравнительный анализ характеристик бандажей колёсных пар, закалённых с использованием лазерного и плазменного источника тепла